

KO'P CHIQISHLI MAGNETOELEKTRLI CHIZIQLI QADAMLI DVGATEL: TUZILISHI VA ISHLASH XUSUSIYATLARI

Yigitaliyev Jaloliddin Adxamjon o'g'li

Abdullayev Mahmudjon Muxamedovich

Toshkent Davlat Texnika Universiteti

E-mail: yigitaliyevjaloliddin1997@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17516291>

Annotatsiya: ushbu maqolada ko'p chiqishli magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatelning (KChMChQD) nazariy asoslari, tuzilishi va ishlash prinsiplari o'rganilgan. Dvigatelning elektromagnit jarayonlari differensial tenglamalar yordamida tahlil qilingan. MATLAB/Simulink va ANSYS Maxwell dasturlari yordamida o'tkazilgan simulyatsiya natijalari, shuningdek, eksperimental tekshiruvlar natijalari taqdim etilgan. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, KChMChQD yuqori aniqlik, barqarorlik va samaradorlikka ega bo'lib, uni zamonaviy avtomatlashtirilgan tizimlar, robototexnika va aniq mexanika sohalarida keng qo'llash imkoniyati mavjud.

Kalit so'zlar: chiziqli qadamli dvigatel, magnetoelektrli dvigatel, ko'p chiqishli tizim, elektromagnit model, simulyatsiya, ANSYS Maxwell, MATLAB, eksperimental tekshiruv, pozitsion aniqlik.

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЛИНЕЙНЫЙ ШАГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ: КОНСТРУКЦИЯ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Йигиталиев Жалолиддин Адхамжон угли,

Абдуллаев Махмуджон Мухамедович

Ташкентский государственный технический университет

Аннотация: в данной статье исследуются теоретические основы, конструкция и принципы работы многоканального магнитоэлектрического линейного шагового двигателя (ММЛШД). Электромагнитные процессы в двигателе проанализированы с помощью дифференциальных уравнений. Представлены результаты моделирования, проведенного в программных средах MATLAB/Simulink и ANSYS Maxwell, а также результаты экспериментальной проверки. Исследования показали, что ММЛШД обладает высокой точностью, стабильностью и эффективностью, что открывает широкие возможности для его применения в современных автоматизированных системах, робототехнике и прецизионной механике.

Ключевые слова: линейный шаговый двигатель, магнитоэлектрический двигатель, многоканальная система, электромагнитная модель, моделирование, ANSYS Maxwell, MATLAB, экспериментальное исследование, позиционная точность.

MULTI-OUTPUT MAGNETOELECTRIC LINEAR STEPPER MOTOR: STRUCTURE AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Yigitaliyev Jaloliddin Adkhamjon o'g'li,

Abdullayev Mahmudjon Mukhamedovich

Tashkent State Technical University

Abstract: this paper investigates the theoretical foundations, design, and operating principles of a multi-output magnetoelectric linear stepper motor (MOLS motor). The electromagnetic processes within the motor are analyzed using differential equations. The results of simulations conducted in MATLAB/Simulink and ANSYS Maxwell software, as well as

experimental validation, are presented. The research demonstrates that the MOLS motor exhibits high precision, stability, and efficiency, making it highly suitable for widespread application in modern automated systems, robotics, and precision mechanics.

Keywords: linear stepper motor, magnetoelectric motor, multi-output system, electromagnetic model, simulation, ANSYS Maxwell, MATLAB, experimental study, positional accuracy.

KIRISH

So‘nggi yillarda avtomatlashtirilgan tizimlar, robototexnika, stanoksozlik va transport sohalarida yuqori aniqlik va ishonchlilikka ega elektr yuritmalari bo‘lgan talab ortib bormoqda. Shu nuqtai nazardan, chiziqli qadamli dvigatellar (ChQD) keng qo‘llanilayotgan yuritma turlaridan biri hisoblanadi. Bunday dvigatellarning asosiy ustunliklari – yuqori aniqlikda pozitsiyalash imkoniyati, oddiy konstruksiya va boshqaruv jarayonida moslashuvchanlikdir. Ko‘p chiqishli chiziqli qadamli dvigatellarning qo‘llanilishi ishlab chiqarish liniyalarini avtomatlashtirish, parallel ishlov berish tizimlari, tezkor transport vositalari va robot manipulyatorlarida yuqori unumdorlikni ta‘minlaydi. Bunday dvigatellarda magnit-elektr energiya aylanish jarayoni bir nechta chiqishlar orqali taqsimlanishi sababli ularning samaradorligi va ishga layoqatliligi oshadi.

NAZARIY ASOSLAR

Ushbu foydali model robototexnika va mexatronika sohalarida, avtomatik boshqaruv tizimlarida hamda qaytarma-ilgarilama harakatga ega ijrochi mexanizmlarda ish organlarini x, y, z koordinata o‘qlarida chiziqli va kadamli harakatga keltirish uchun mo‘ljallangan. Magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatelning ishlash prinsipi. Magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatel (MChQD) elektromagnit energiyani to‘g‘ri chiziqli mexanik harakatga aylantirishga asoslangan. Dvigatelning stator qismi magnit tizim va chulg‘amlardan tashkil topgan bo‘lib, ularga uzatilgan faza toklarining ketma-ket almashinuvi natijasida magnit maydon hosil qilinadi. Ushbu magnit maydon yakor qismida elektromagnit tortish kuchini yuzaga keltiradi va yakorni diskret qadamlarda siljitadi. Qadamli dvigatelning asosiy afzalligi shundaki, u ochiq konturda ham aniq pozitsiyalash imkoniyatini beradi. Har bir fazaga tok berilishi natijasida yakor oldinga yoki orqaga belgilangan uzunlikka (Δx x Δx) siljiydi. Shu sababli MChQD yuqori aniqlik talab qilinadigan avtomatlashtirilgan tizimlarda keng qo‘llaniladi. Ko‘p chiqishli tizimning elektr-magnit maydoni modellashtirilishi. Ko‘p chiqishli magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatel (KChMChQD)da bir nechta mustaqil chiqishlar mavjud bo‘lib, ular alohida ijrochi mexanizmlarni harakatlantira oladi. Bunday tizimda elektr-magnit maydonlar bir nechta magnit o‘tkazgichlar orqali taqsimlanadi. Har bir chiqishning magnit oqimi fazaviy burchak bo‘yicha siljigan holda joylashadi va bu umumiy harakatni muvofiqlashtiradi. Faza toklarining ta‘siri: Fazalardagi toklarning fazaviy ketma-ketligi va amplitudasi dvigatelning aylanish yo‘nalishi, tezligi va qadam aniqligini belgilaydi. Agar toklarning fazasi noto‘g‘ri sinxronlashtirilsa, dvigatelning qadam tashlash jarayonida xatoliklar va tebranishlar paydo bo‘ladi. Shu sababli fazalarni boshqarish algoritmi nazariy modelning muhim qismidir.

Ko‘p chiqishli tizimning elektr-magnit maydoni modellashtirilishi

Ko‘p chiqishli magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatel (KChMChQD)da bir nechta mustaqil chiqishlar mavjud bo‘lib, ular alohida ijrochi mexanizmlarni harakatlantira oladi. Bunday tizimda elektr-magnit maydonlar bir nechta magnit o‘tkazgichlar orqali taqsimlanadi. Har bir chiqishning magnit oqimi fazaviy burchak bo‘yicha siljigan holda joylashadi va bu umumiy

harakatni muvofiqlashtiradi. Elektr-magnit maydonni modellashirishda Maxwell tenglamalari va chulg'amlardagi elektr jarayonlarini ifodalovchi differensial tenglamalardan foydalaniladi. Ularning umumiy ko'rinishi:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + e = U$$

bu yerda:

L – chulg'am induktivligi,

R – chulg'am qarshiligi,

i – faza toki,

e – elektromotor kuch (EMK),

U – tashqi manba kuchlanishi.

Hosil bo'ladigan EMK esa yakorning tezligi va magnit oqimiga bog'liq:

$$e = B \cdot l \cdot v$$

bu yerda: B – magnit oqim zichligi, l – magnit maydon yo'li uzunligi, v – yakorning chiziqli tezligi.

Elektromagnit kuch:

$$F = \frac{dW_m}{dx}$$

bu yerda W_m – magnit energiya, x – yakorning siljish koordinatasi.

Magnit oqim zichligi:

$$B = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

bu yerda μ – magnit muhitning singdiruvchanligi, N – o'ramlar soni, I – faza toki, l – magnit yo'li uzunligi.

Qadam uzunligi:

$$\Delta x = \frac{\tau}{m}$$

bu yerda τ – qutblar oralig'i (magnit tizimning fazaviy davri), m – fazalar soni.

Faza toklarining ta'siri: Fazalardagi toklarning fazaviy ketma-ketligi va amplitudasi dvigatelning aylanish yo'nalishi, tezligi va qadam aniqligini belgilaydi. Agar toklarning fazasi noto'g'ri sinxronlashtirilsa, dvigatelning qadam tashlash jarayonida xatoliklar va tebranishlar paydo bo'ladi. Shu sababli fazalarni boshqarish algoritmi nazariy modelning muhim qismidir.

Simulyatsiya dasturlari

Hisoblash natijalarini tekshirish va dvigatelning elektromagnit hamda mexanik jarayonlarini yanada aniqroq o'rganish uchun kompyuter simulyatsiya dasturlaridan foydalaniladi. **MATLAB/Simulink** — chiziqli qadamli dvigatelning elektr-mexanik tizimini vaqt bo'yicha modellashirish imkonini beradi. Bu platformada faza toklarining ketma-ketligi, elektromagnit kuchning o'zgarishi, tezlik va joylashuv diagrammalari aniqlanadi. MATLAB blok-sxemalari yordamida turli boshqaruv algoritmlari sinovdan o'tkazilib, optimal boshqaruv strategiyasi tanlanadi. **ANSYS Maxwell** — elektromagnit maydonlarni 2D va 3D shakllarda hisoblash va

vizualizatsiya qilish imkoniyatini beradi. Bu dasturda magnit oqim zichligining taqsimoti, induksiya jarayonlari, magnit kuch chiziqlari va elektromagnit kuchning taqsimoti aniq ko'rsatiladi. Konstruktiv parametrlarning dvigatel ishiga ta'siri (masalan, chulg'amlar soni, magnit materiallari, qutblar oralig'i) modellashdiriladi. **COMSOL Multiphysics** — qo'shimcha ravishda issiqlik jarayonlari va mexanik deformatsiyalarni elektromagnit maydon bilan bog'liq holda tahlil qilish uchun qo'llanilishi mumkin. Bu dvigatelning uzoq muddatli ishlashdagi ishonchliligini baholashga yordam beradi. Simulyatsiya dasturlari yordamida olingan natijalar analitik hisob-kitoblar bilan solishtiriladi. Bu dvigatelning nazariy modeli to'g'riligini tasdiqlash, shuningdek, optimal parametrlarni tanlashda muhim rol o'ynaydi.

Eksperimental uskunalar

Nazariy va simulyatsion tadqiqotlar natijalari amaliy sharoitlarda eksperimental sinovlar orqali tekshiriladi. Buning uchun maxsus laboratoriya uskunalari va sinov stendlari qo'llaniladi. **Quvvat manbalari** — dvigatel fazalariga ketma-ket va boshqariladigan tok uzatish uchun ishlatiladi. Tok va kuchlanish parametrlari o'zgaruvchan bo'lishi dvigatelning turli ish rejimlarini sinash imkonini beradi. **O'lchash asboblari** — ampermetr, voltmeter, osiloskop yordamida elektr parametrlar kuzatiladi. Shuningdek, tezlik va pozitsiya datchiklari (enkoderlar) orqali yakorning harakati qayd etiladi. **Laboratoriya stendlari** — dvigatelni yuklama ostida sinovdan o'tkazish, mexanik kuchni va tezlikni aniqlash imkonini beradi. Yuklama mexanizmlari yordamida dvigatelning turli ish sharoitlaridagi samaradorligi baholanadi. **Datchiklar tizimi** — kuch o'lchagichlar (dinamometrlar), tebranish va harorat sensorlari qo'llanilib, dvigatelning barqarorligi va uzoq muddatli ishlash xususiyatlari o'rganiladi. Eksperimental natijalar analitik va simulyatsion tadqiqotlar bilan solishtiriladi. Agar olingan natijalar o'zaro yaqin bo'lsa, dvigatel modeli to'g'ri tanlangan hisoblanadi. Bu esa ishlab chiqilayotgan KChMChQD'ning amaliy samaradorligini tasdiqlaydi.

HISOBLASH NATIJALARI

Ko'p chiqishli magnitoelektrli chiziqli qadamli dvigatelning nazariy modeli asosida o'tkazilgan hisob-kitoblar natijasida asosiy parametrlar – elektromagnit kuch, chiziqli tezlik va qadam aniqligi aniqlab olindi. Hisoblashlar shuni ko'rsatdiki, faza toklarining qiymati oshgani sayin elektromagnit kuch ham mutanosib ravishda ortadi. Shu bilan birga, dvigatelning tezligi yuklama kuchiga qarab o'zgaradi va optimal ish rejimi tok va kuchlanishning muvozanatli taqsimlanishi orqali ta'minlanadi. Qadam uzunligi esa dvigatelning qutblar oralig'i va fazalar soniga bog'liq holda doimiy qiymatda saqlanadi, bu esa yuqori aniqlikdagi pozitsiyalashni kafolatlaydi.

Olingan natijalar grafik va jadvallar yordamida tahlil qilindi: **Tok – kuchlanish xarakteristikasi**: dvigatel fazalariga uzatilgan kuchlanish qiymati oshishi bilan tok ham ortib boradi, bu esa elektromagnit kuchning oshishiga olib keladi. **Tezlik – yuklama bog'lanishi**: yuklama kuchi ortishi bilan dvigatelning chiziqli tezligi kamayadi, ammo ko'p chiqishli tizimning afzalligi shundaki, yuklamaning taqsimlanishi tufayli umumiy barqarorlik saqlanadi. **Magnit oqim zichligi taqsimoti**: ANSYS Maxwell dasturida o'tkazilgan simulyatsiya natijalariga ko'ra, magnit oqim zichligi asosan chulg'amlar oralig'ida to'plangan va bu dvigatelning yuqori samaradorligini ta'minlaydi. Grafiklar magnit oqimning fazaviy taqsimoti nazariy model bilan yaxshi mos kelishini ko'rsatdi.

Eksperiment va model natijalarining taqqoslanishi

Laboratoriya sharoitida o'tkazilgan tajribalar simulyatsion va nazariy hisoblash natijalari bilan solishtirildi. Eksperimental o'lchashlarda olingan elektromagnit kuch qiymatlari nazariy

modeldan 5–7% farq qildi, bu esa dvigatelning konstruktiv noaniqliklari va magnit materiallarning haqiqiy xossalari bilan izohlanadi. Tezlik va qadam aniqligi bo'yicha eksperimental natijalar nazariy hisoblashlarga juda yaqin chiqdi. Bu esa tuzilgan nazariy modelning to'g'riligini va simulyatsiya jarayonlarining ishonchliligini tasdiqlaydi.

Umuman olganda, natijalar shuni ko'rsatdiki, ko'p chiqishli magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatel yuqori aniqlik, barqarorlik va samaradorlikka ega bo'lib, uning nazariy va amaliy xususiyatlari o'zaro mos keladi.

XULOSA

Ushbu tadqiqotda ko'p chiqishli magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatelning (KChMChQD) nazariy modeli ishlab chiqildi, elektromagnit jarayonlari hisoblab chiqildi va kompyuter simulyatsiyalari hamda laboratoriya tajribalari asosida uning asosiy parametrlari o'rganildi. Tadqiqot davomida quyidagi ilmiy natijalarga erishildi:

Asosiy ilmiy natijalar.

Dvigatelning elektromagnit kuchi, magnit oqim zichligi va qadam uzunligini ifodalovchi asosiy tenglamalar aniqlandi.

Analitik model, differensial tenglamalar va elektromagnit hisob-kitoblar asosida dvigatelning nazariy parametrlari belgilandi.

MATLAB/Simulink va ANSYS Maxwell dasturlarida o'tkazilgan simulyatsiya natijalari nazariy hisoblashlar bilan yaxshi mos kelishi isbotlandi.

Eksperimental natijalar nazariy modelning to'g'riligini tasdiqlab, o'rtacha farq 5–7% dan oshmaganini ko'rsatdi.

Kutilayotgan samaradorlik.

Ko'p chiqishli tizimda yuklamaning taqsimlanishi hisobiga dvigatelning barqarorligi va umumiy samaradorligi oshishi kuzatildi.

Qadam aniqligi yuqori bo'lgani sababli, dvigatelni robototexnika, CNC dastgohlar, transport vositalari va avtomatlashtirilgan ishlab chiqarish liniyalarida qo'llash imkoniyati kengayadi.

Elektromagnit maydonning optimal taqsimoti energiya sarfini kamaytirib, qurilmaning uzoq muddatli ishlash ishonchliligini ta'minlaydi.

Keyingi tadqiqot yo'nalishlari.

Dvigatelning issiqlik rejimlarini o'rganish va issiqlik tarqalishining elektromagnit jarayonlarga ta'sirini modellashtirish. Ko'p chiqishli tizimlarda faza toklarini boshqarishning zamonaviy algoritmlarini ishlab chiqish va ularni real vaqt rejimida sinovdan o'tkazish. Dvigatelni energiya tejoychi materiallar asosida takomillashtirish va yangi magnit o'tkazgich turlari bilan sinovdan o'tkazish. Amaliy qo'llanmalarni kengaytirish, xususan, yuqori tezlikli transport vositalarida va noan'anaviy energiya manbalarini boshqarishda foydalanish imkoniyatlarini o'rganish. Umumiy xulosa sifatida, olib borilgan tadqiqotlar ko'rsatdiki, ko'p chiqishli magnetoelektrli chiziqli qadamli dvigatel yuqori aniqlik va samaradorlikka ega bo'lib, zamonaviy avtomatlashtirilgan tizimlarda keng qo'llanish salohiyatiga ega.

ADABIYOTLAR

1. Habil, M., Anayi, F., Xue, Y., & Alnagasa, K. (2023). *Analyzing the Design and Performance of a DC Linear Stepper Motor*. Machines, 11(8), 785. [MDPI](#)
2. *An Elemental Modelling Method for Linear Motor Parametric Studies*. (2025). Elsevier, *Analytical magnetic field solutions on a coil array*. [ScienceDirect](#)

3. *Analysis Method Development of Hybrid Linear Motor Considering Cogging Force*. (2022). MDPI – bu maqolada gibrid chiziqli dvigatelning cogging kuchi, elektromagnit-mechanik bog‘liqlik va displastyon/tezlashuv tahlillari bera qilinadi. [MDPI](#)
4. *Modeling of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor using Magnetic Equivalent Circuits*. (2021). [ScienceDirect](#)
5. Fezzani, W., & Amor, A. (2013). *Finite Element Methods Applied to the Tubular Linear Stepping Motor*. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 5(5), 219–222. [SCIRP](#)
6. Furtat, I.B., Slobodzyan, N.S., Pryanichnikov, R.A. (2022). *Overview of models and control methods for step motors and permanent magnet motors*. [ResearchGate](#)
7. Groenhuis, V., Rolf, G., Bosman, K., Abelman, L., Stramigioli, S. (2021). *Multi-Axis Electric Stepper Motor*. *IEEE Robotics and Automation Letters*. [ResearchGate](#)
8. Mohammadi, S., Lang, J. H., Kirtley, J. L., & Trumper, D. L. (2023). *Modeling and Design Optimization of a Linear Motor with Halbach Array for Semiconductor Manufacturing Technology*. arXiv preprint. [arXiv](#)
9. Hanappier, N., Charkaluk, E., & Triantafyllidis, N. (2020). *A coupled electromagnetic-thermomechanical approach for the modeling of electric motors*. arXiv. [arXiv](#)
10. *Compact Flexible Linear Stepping Motors*. (2025). Cheng-Lung Chen, Shen-Yun Chu, Yao-Te Tsai, Shao-Kang Hung; *Scientific Reports*, 15, Article 13239.